

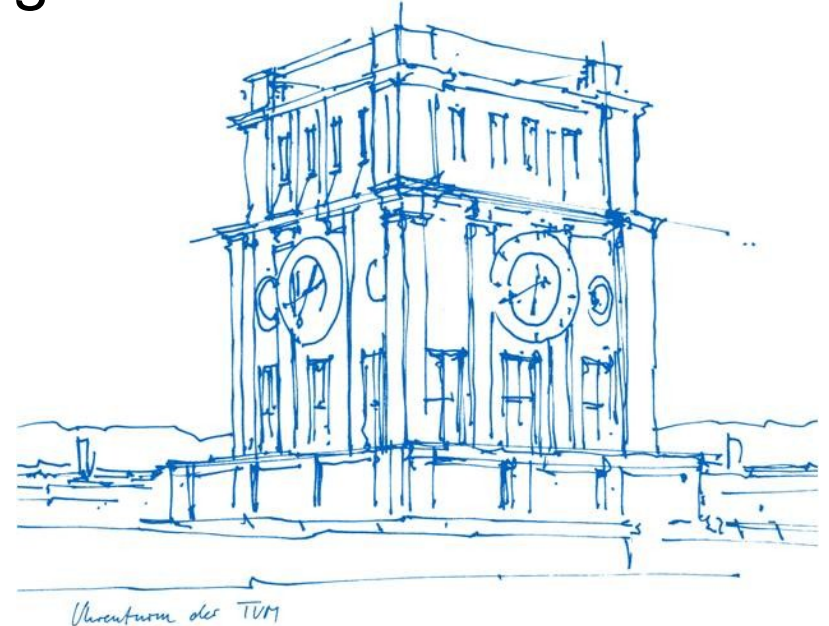
Simulative Untersuchung des stationären und dynamischen Betriebsbereichs eines Synchrongenerators im Inselnetzbetrieb

Johanna Timmermann

S. Hötzel, C. Bernecker-Castro, R. Witzmann,
T. Lechner, S. Seifried, M. Finkel,
D. Menker, C. Dellmann, G. Störzer

Technische Universität München

Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgungsnetze



Agenda

Motivation

Methodische Vorgehensweise

Funktionsüberprüfung: Begrenzerfunktionen und Generatorschutzfunktionen

Statischer Betriebsbereich

Dynamischer Betriebsbereich

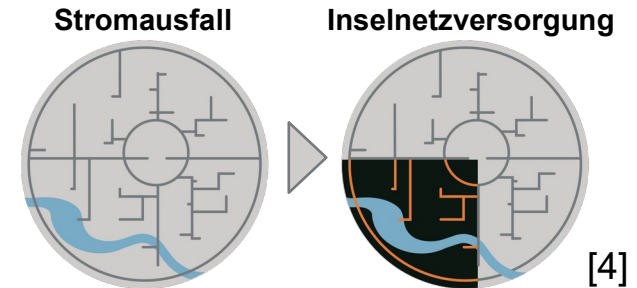
Zusammenfassung und Ausblick

Motivation

Inselnetze bieten eine gute Möglichkeit die Versorgungssicherheit zu erhöhen [1]

- Notstromversorgung eines begrenztes Netzgebiets durch dezentralen Erzeugungsanlagen im Inselnetzbetrieb

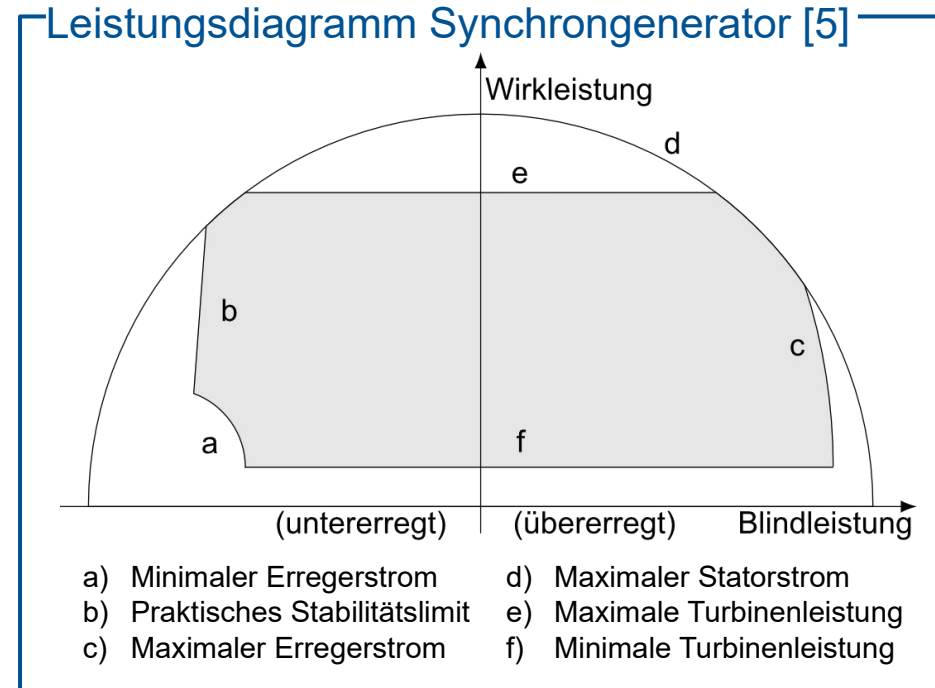
Im Forschungsprojekt LINDA 2.0 wurde eine automatisierte Notstromversorgung einer Trinkwasserversorgungsanlage über ein Laufwasserkraftwerk im Inselnetzbetrieb erfolgreich umgesetzt [2]



- Simulationsmodelle ermöglichen die Planung und Analyse möglicher Betriebsfälle des Inselnetzbetriebs [3]
- Realitätsnahe und aussagekräftige Modellierung maßgeblich abhängig von der Güte und Genauigkeit einzelner Teilmodelle
 - **Insbesondere der Synchrongenerator für das betrachtete Inselnetz**

Motivation

- Betriebsbereich eines Synchrongenerators, dargestellt im Leistungsdiagramm
- Berücksichtigung der Belastungsgrenzen wichtig, da der Generator im Inselnetzbetrieb die Lastanforderungen erfüllen muss
 - Sicherstellen der Anwendbarkeit des Modells auf andere Lastszenarien
- Simulative Untersuchung des Betriebsbereichs
 - Plausibilisierung des Modells

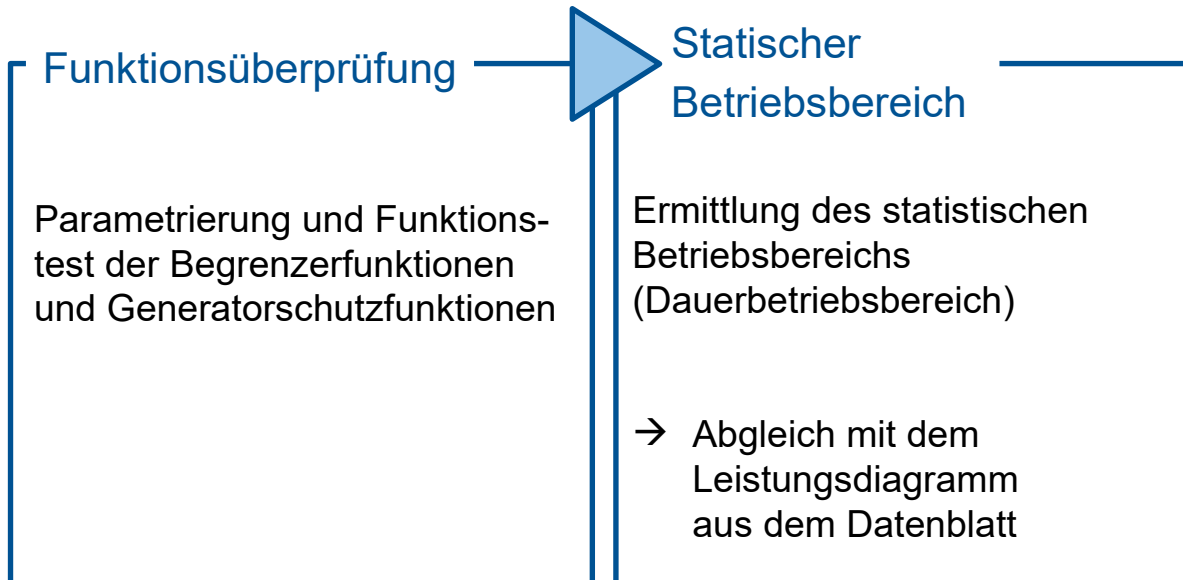


Methodische Vorgehensweise

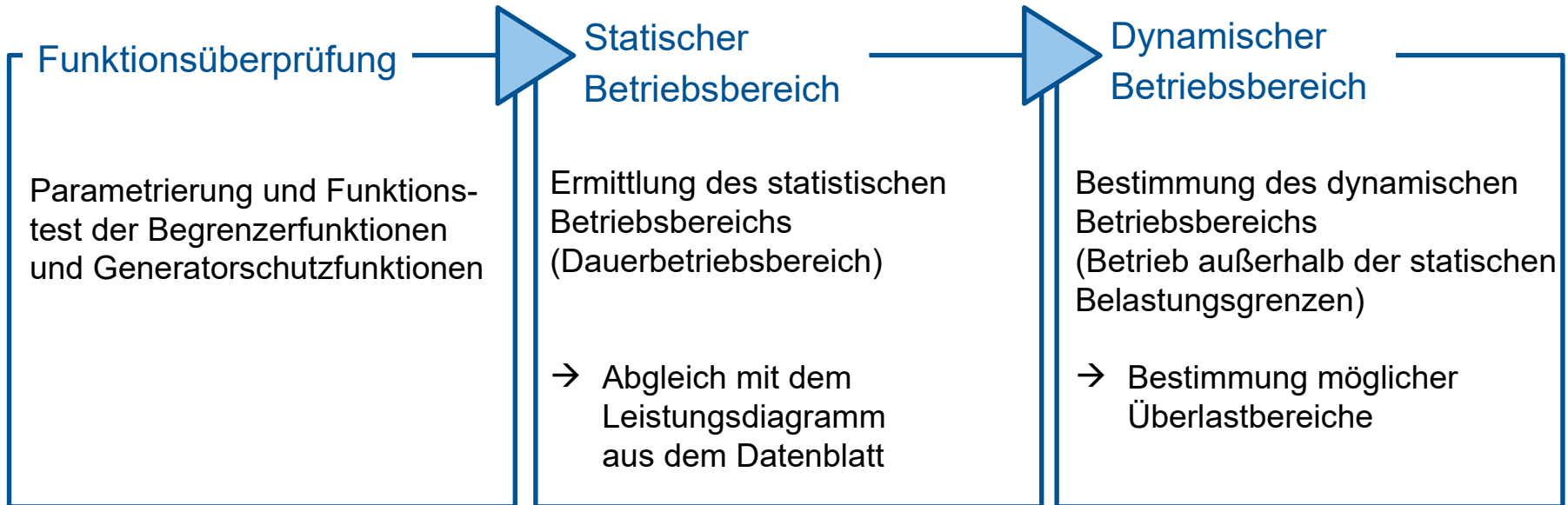
Funktionsüberprüfung

Parametrierung und Funktions-
test der Begrenzerfunktionen
und Generatorschutzfunktionen

Methodische Vorgehensweise



Methodische Vorgehensweise



Untersuchungsgegenstand

Laufwasserkraftwerk, als Führungskraftwerk einer automatisierten Inselnetznotstromversorgung [6]

Kaplan Turbine: 4,84 MW

Synchrongenerator: 5,5 MVA

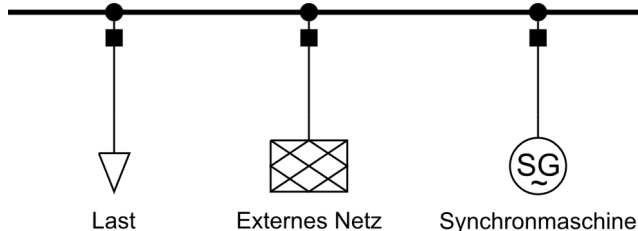
Statisches Erregersystem: kaskadierte Spannungs- und Stromregelung



[4]

Netzmodell in PowerFactory [7]

Generatorsammelschiene



Modellierung des Laufwasserkraftwerks

Synchronmaschine [8]:

- Schenkelpol Bauweise

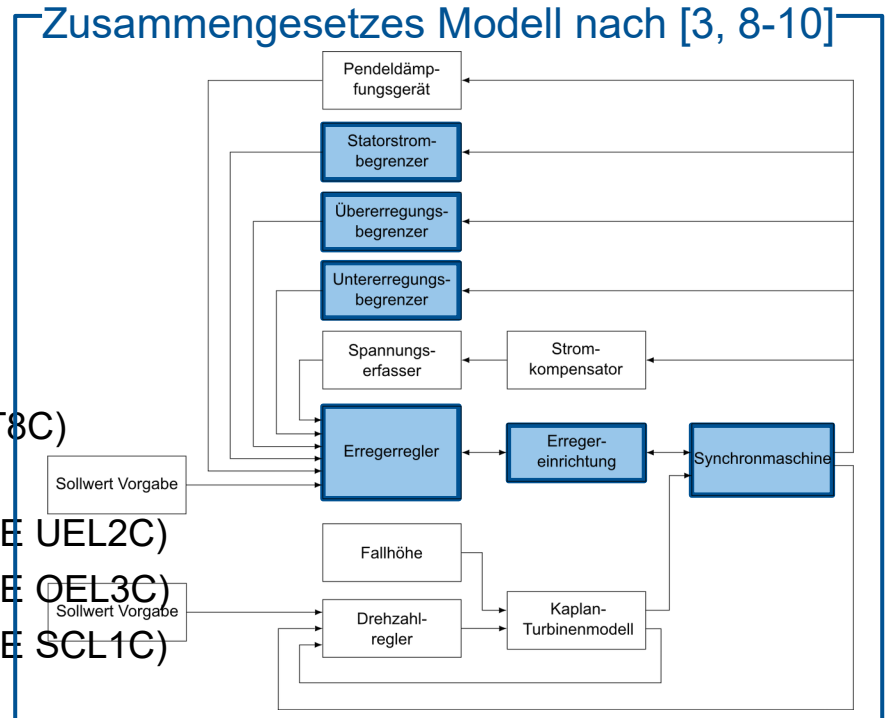
Wirkleistungsregelkreis nach [9]:

- Kaplan-Turbinenmodell
- Drehzahlregler

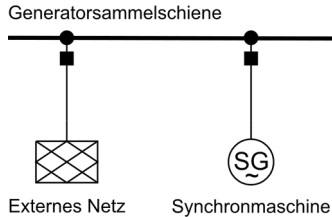
Spannungsregelkreis nach [10]:

- Statisches Erregereinrichtung (IEEE ST8C)
- Erregerregler / Spannungsregler (IEEE ST8C)
- Begrenzerfunktionen
 - Untererregungsbegrenzer (IEEE UEL2C)
 - Übererregungsbegrenzer (IEEE OEL3C)
 - Statorstrombegrenzer (IEEE SCL1C)
 - Minimaler Erregerstrom

(IEEE ST8C)
(IEEE ST8C)
(IEEE UEL2C)
(IEEE OEL3C)
(IEEE SCL1C)



Funktionstest Untererregungsbegrenzer (UEB)



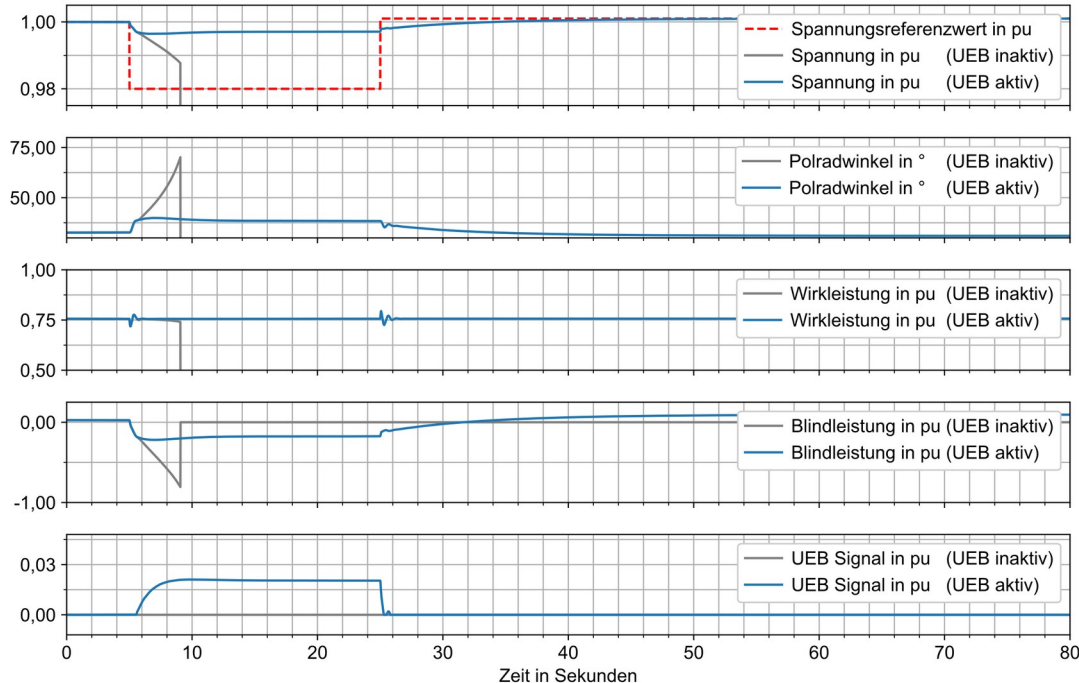
Anfangswirkleistung: 0,75 pu

Anfangsblindleistung: 0 pu

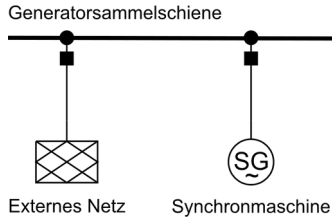
Änderung Spannungsreferenzwert:

- Bei 5 s von 1 pu auf 0,98 pu
- Bei 25 s Normalisierung

→ Ohne UEB – Generator fällt außer Tritt



Funktionstest Übererregungsbegrenzer (ÜEB)

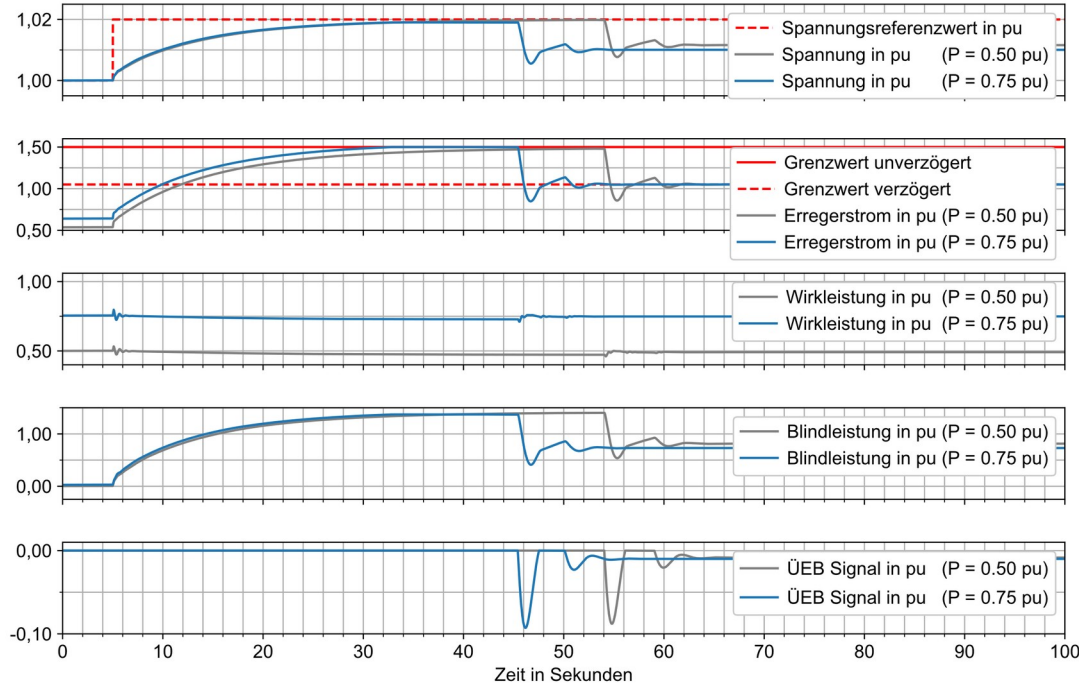


Anfangswirkleistung: 0,75 pu & 0,5 pu
Anfangsblindleistung: 0 pu

Änderung Spannungsreferenzwert:

- Bei 5 s von 1 pu auf 1,02 pu

→ Inverse Zeit Charakteristik des ÜEB
→ Unverz. Begrenzung max. Erregerstrom

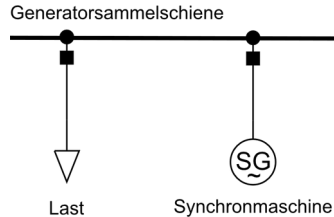


Weitere Generatorschutzfunktionen im Inselnetzbetrieb

	Auslösewert	Auslösezeit
Unterfrequenzschutz $f <$	43 Hz	30 s
Überspannungsschutz $U >$	120 %	0,5 s Meldung (keine Auslösung)
Überspannungsschutz $U >>$	145 %	1,0 s
Überstromschutz $I >$	120 %	3,5 s

→ **Schutzeinstellungen ermöglichen einen großen Spannungs- und Frequenzbereich im Inselnetzbetrieb**

Überprüfung des Betriebsbereichs



Randbedingungen:

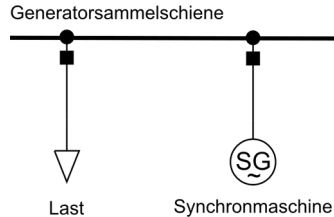
- Generator im Inselnetzbetrieb – Belastung durch statische Last (Z Last)
- Bereich: Wirkleistungen: 0 pu bis 1,05 pu
Blindleistungen: -1,05 pu bis 1,05 pu } Schrittweite: 0,02 pu
- Laständerung: 0,05 pu (größer außerhalb des Leistungsdiagramms)
- Zeitpunkt der Laständerung: 0 s Maximale Simulationsdauer: 300 s
- Simulationsstopp: Anregung einer Begrenzerfunktion oder Schutzfunktion

Auswertung: Zeitdauer bis Anregung Begrenzerfunktion oder Schutzfunktion

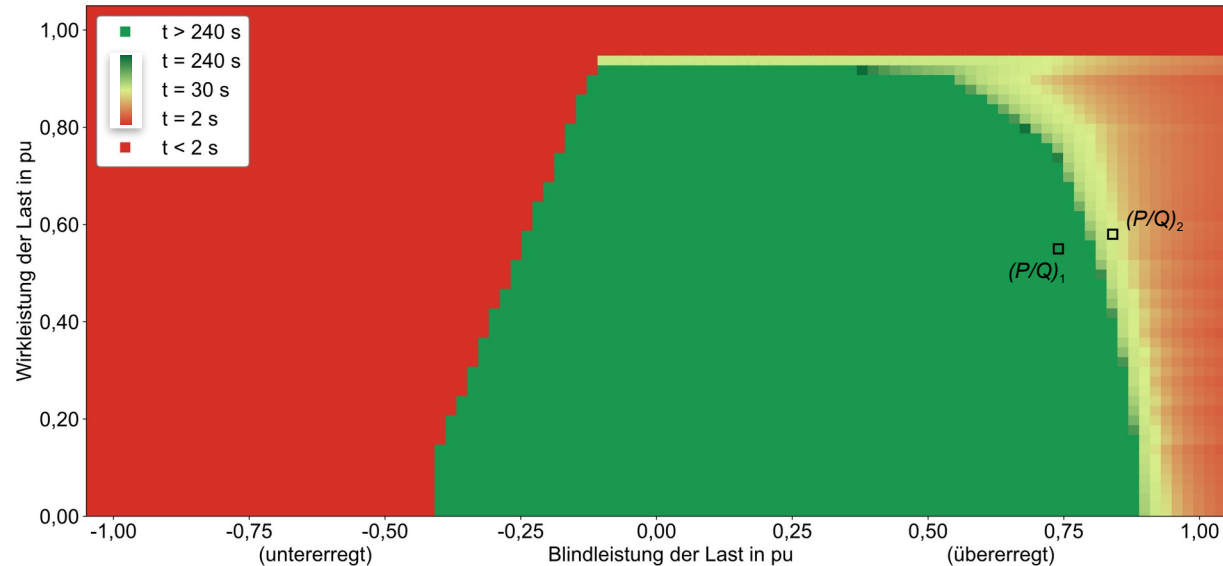
Annahmen:

- konstante Fallhöhe → Ausbaufallhöhe, voll geöffnet bei maximaler Turbinenleistung
- Turbinenbetriebsmodus: Dynamisch optimierter $a_0\phi$ -Zusammenhang
- Wirk- und Blindleistungsstatik vernachlässigt – direkte Sollwertvorgabe

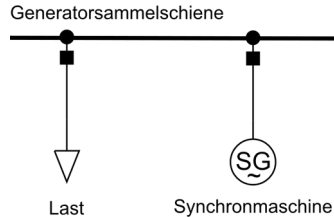
Statischer Betriebsbereich / Dauerbetriebsbereich



- Beispielhafte Laständerung
 $(P/Q)_1 = (0,55 \text{ pu} / 0,75 \text{ pu})$
 $(P/Q)_2 = (0,58 \text{ pu} / 0,84 \text{ pu})$
- Auswertung der Simulationsdauer nach Belastungsänderung

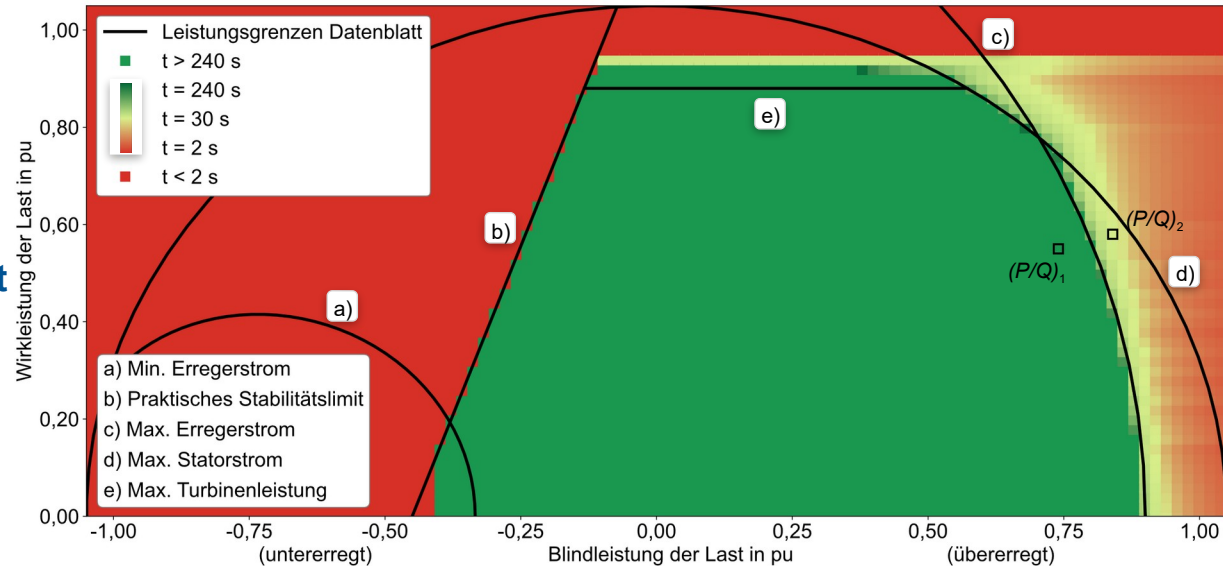


Statischer Betriebsbereich / Dauerbetriebsbereich

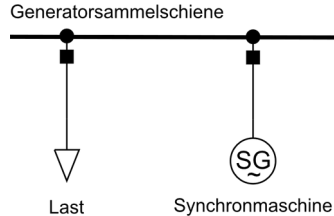


→ **Gute Übereinstimmung mit Leistungsgrenzen im Datenblatt**

→ **Grenze minimaler Erregerstrom durch Sättigungseffekte überlagert**



Dynamischer Betriebsbereich

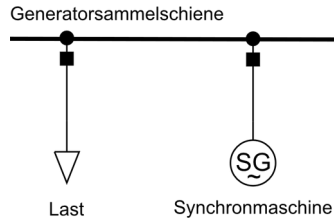


Randbedingungen:

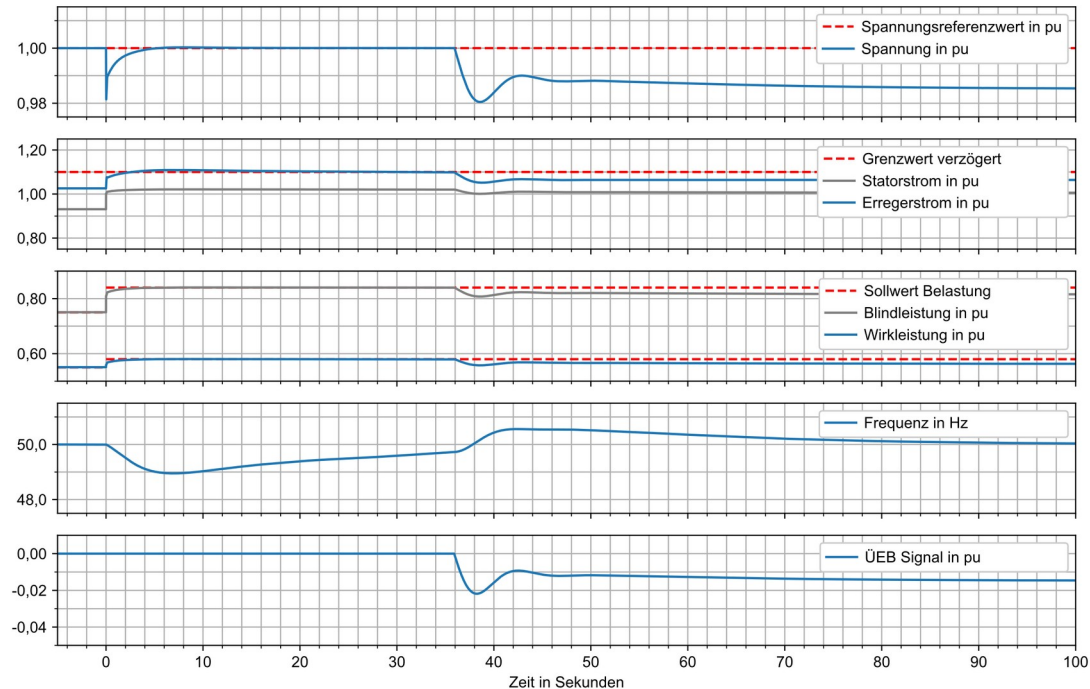
- Generator im Inselnetzbetrieb – Belastung durch statische Last (Z Last)
- Bereich: außerhalb des Dauerbelastungsgrenzen
- Maximale Simulationsdauer: 300 s
- Simulationsstopp bei Anregung einer Schutzfunktion:
 - Unterfrequenzschutz $f <$: 43 Hz, Auslösezeit: 30 s
 - Überspannungsschutz $U >>$: 145 %, Auslösezeit: 1 s
 - Überstromschutz $I >$: 120 %, Auslösezeit: 3,5 s

Auswertung: Stationärer Spannungswert bei maximaler Simulationsdauer

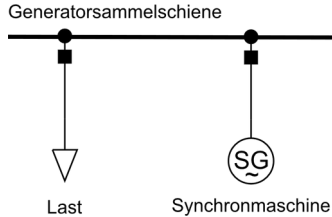
Dynamischer Betriebsbereich



- Beispielhafte Laständerung
 $(P/Q)_1 = (0,55 \text{ pu} / 0,75 \text{ pu})$
 $(P/Q)_2 = (0,58 \text{ pu} / 0,84 \text{ pu})$
- Bis ca. 36 s Spannung = 1 pu
→ Übererregungsbegrenzer wird aktiv
→ Spannung sinkt um 0,01 pu

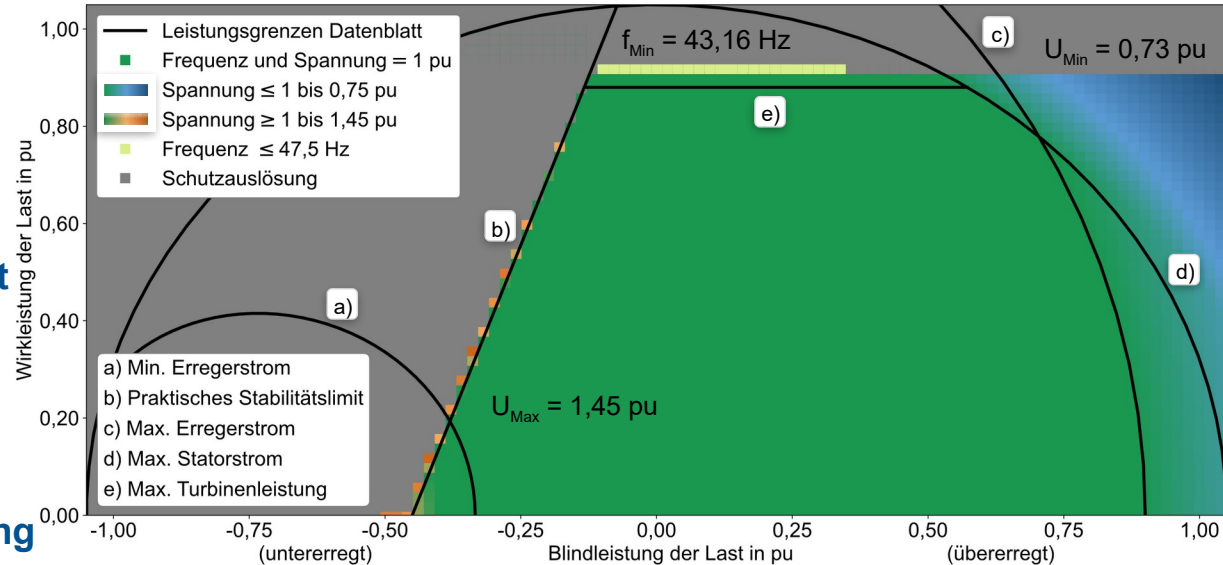


Dynamischer Betriebsbereich

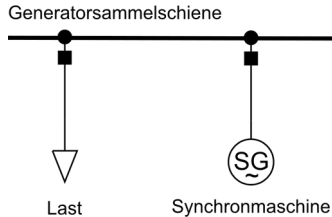


→ **Spannungsregelung beeinflusst durch Begrenzerfunktionen**

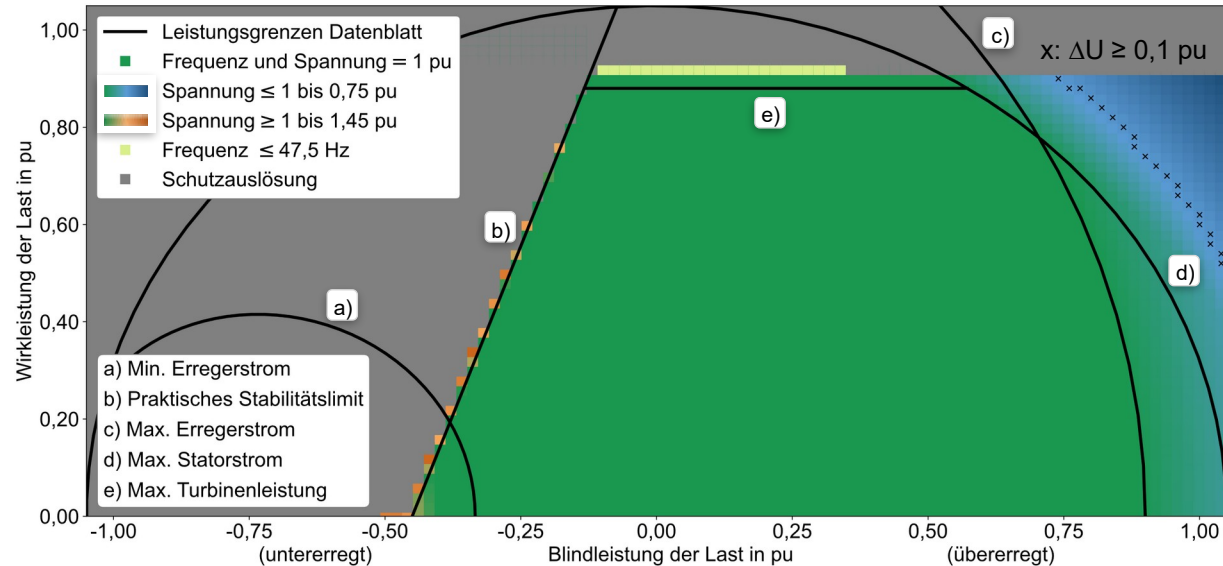
→ **Auslösung des Frequenzschutzes wenn:
Leistung > max. Turbinenleistung**



Dynamischer Betriebsbereich



- Übererregter Betrieb:
max. Belastung $\Delta U \geq 0,1$ pu: x
→ **kurzzeitige Überlastung möglich**
- Untererregter Betrieb:
Spannung überschreitet 1,2 pu
→ **Überschreitung der Grenze kritisch**



Zusammenfassung und Ausblick

- Erfolgreiche Funktionsüberprüfung der Begrenzerfunktionen
 - Untersuchungen des Grenzbereichs und außerhalb der Dauerbelastungsgrenzen möglich
 - Gute Übereinstimmung mit dem Leistungsdiagramm aus dem Datenblatt
 - Plausibilisierung des Modells für den gesamten Betriebsbereich
 - Ermittlung eines dynamischen Betriebsbereichs möglich
 - Limitierung durch das Zeitverhalten der Begrenzerfunktionen und dem zulässigen Spannungsbereich
- **Untersuchungen von kritischen Belastungsfällen nur möglich wenn Begrenzerfunktionen abgebildet**
- **Weiterführende Untersuchungen: Auswirkung von Einflussfaktoren wie die Dauer und die Höhe der Belastung oder kritischen Belastungsfällen**

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Johanna Timmermann

Technische Universität München

TUM School of Engineering and Design

Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgungsnetze

Tel. +49 89 289 22017

johanna.timmermann@tum.de

www.epe.ed.tum.de/hsa



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Referenzen

- [1] C. Steinhart, Lokale Inselnetz-Notversorgung auf Basis dezentraler Erzeugungsanlagen mit Fokus auf die Frequenzstabilität, München: Dissertation, Technische Universität München, 2020.
- [2] TV-Beitrag: <https://www.augsburg.tv/mediathek/video/linda-2-0-notstromversorgung-durch-erneuerbare-energien-2/>
- [3] J. Timmermann, C. Bernecker-Castro, R. Witzmann, T. Lechner, S. Seifried, M. Finkel, D. Menker, C. Dellmann und G. Störzer, Automated Emergency Power Supply for Drinking Water Supply by a Hydro Power Plant in Islanded Grid Operation, Rom: 27th International Conference on Electricity Distribution, 2023.
- [4] Projektflyer, „LINDA 2.0 Optimierte Notversorgung mit erneuerbaren Energien“, 2022.
- [5] A. Binder, Elektrische Maschinen und Antriebe, Heidelberg: Springer Vieweg Berlin, 2017.
- [6] J. Timmermann, C. Bernecker-Castro, R. Witzmann, T. Lechner, S. Seifried, M. Finkel, D. Menker, C. Dellmann, G. Störzer, D. Stenzel und C. Vogel, „Dynamische Modellierung der Notfallversorgung einer Trinkwasserversorgung durch ein Laufwasserkraftwerk im Inselbetrieb,“ 17. Symposium Energieinnovation TU Graz, Graz, 2022.
- [7] DlgSILENT GmbH, 2022. [Online]. Available: <https://www.digsilent.de/de/powerfactory.html>.
- [8] DlgSILENT GmbH, „Technical Reference Documentation – Synchronous Machine (ElmSym, TypSym),“ 2022.
- [9] M. Gratza, C. Steinhart, R. Witzmann, M. Finkel und C. Dellmann, „Parametrierung eines dynamischen Kaplan-Turbinen-Modells anhand von Messdaten für den Inselnetzbetrieb,“ 16. Symposium Energieinnovation TU Graz, Graz, 2020.
- [10] „IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability,“ in IEEE Std 421.5-2016 (Revision of IEEE Std 421.5-2005), 2016, p. 1–207.